

# 找矿和考古的新方法新技术

张 翅

(地质系)

**摘 要** 利用最新的地球物理数据收录系统和岩性电测仪找矿; 利用某些成熟的、行之有效的常规地球物理方法(如直流电阻率法、电测深法、浅层地震法、遥感技术等), 和最新的地球物理收录系统和岩性电测仪发现古迹; 利用一些最新的探伤方法(如射线探伤、红外辐射探伤、超声波探伤、工业电视探伤)对古建筑物和各种古物进行探伤。

**关键词** 地球物理, 数据收录系统, 岩性电测仪, PS 法, 找矿, 考古, 探伤。

**分类号** P319.3

## 0 引 言

随着找矿和勘探水平的不断提高, 对于寻找隐伏的盲矿体, 尤其是埋深较大的矿体及深部地质构造, 常规的地球物理方法已远远不能适应新形势的需要, 造成国家大量人力物力的浪费。为了彻底改变国内找矿的落后局面, 必须采用新技术。只有这样, 才能取得明显的地质效果和经济效益, 使找矿工作有新突破。中国是一个历史悠久的文明古国, 地下埋藏许多很有价值的古建筑和丰富的古物, 发现和挖掘这些财富对于后人了解人类历史, 寻找价值连城的宝物有着十分重要的意义。

## 1 地球物理探矿新方法新技术的引进开发

美国生产的GDP-12地球物理数据收录系统, 可作多种电法勘探, 它带微机处理系统, 工作时数字显示, 同时打印结果, 并将各参数录在磁带上供大型计算机反演, 操作简单、抗干扰力强, 重量只有 16 kg, 适合野外作业。它的勘探深度大, 可达 1 000 m—3 000 m, 可解决深部构造和矿产问题。这是常规物探方法所不能做到的。

美国研制的最新产品——岩性电测仪, 它的主要优点(即主要的地质效能): a. 勘探深度大(可解决 6 000 m 深度范围内的地层和构造问题), 精度高, 地质效果十分惊人(该仪器已在我国的任丘油田等地进行了方法的有效性试验), 分辨率高, 相对误差小(能测出有几层岩矿层, 每层厚度, 顶底板埋深, 基岩介石, 并能绘制出卡斯特三维空间分布图, 还可确定含水层厚度、顶深); b. 应用范围广(煤田, 油区, 普查找矿, 水文工程地质); c. 岩性探测力强(可探查岩层相对电阻率的很小变化, 区分油气水和某些金属, 估计品位); d. 体积小, 重量轻(体积只有 30 cm 长, 20 cm 宽, 10 cm 高, 重量只有 5 kg); e. 场源为太阳光(不需笨重的供电系统); f. 无地表破坏, 还适合于城市工程地质等, 可代替浅层

1990 年 5 月 14 日收到。

地震法；g 操作简单(打开电源开关,调节深度控制旋钮,用耳机听音调和音响,并记录在音调-深度图上即可)。

下面介绍使用这种仪器的一种探测方法——岩性电测深法(PS法)。它的工作原理是:太阳光是这种方法的激发场源,在太阳周围空间产生的离子辐射和电磁辐射形成太阳风,使地磁场发生畸变,激发电离层产生脉冲电磁波,垂直射入地下,地下不同导电介质产生反辐射脉冲电磁波,被仪器接收并转换成声音,操作员用耳机监听音调的变化,据以确定反射界面的埋深、厚度、属性(油气、水、铀、铅、锌、铜、银、铁等)。因为不同成分或品位的地质体,具有不同音调。

界面深度的确定,当地下有几个不同电阻率的几个岩层时,在电阻率发生跃变的界面上,仪器产生一个瞬间脉冲,发出一个瞬间的音响,可听到高低不同的音调,这音调改变所对应的深度,即界面深度(可直接从仪器操作面板上的深度旋钮上读出来),这是因为反射场的频率与岩层电阻率和界面深度有关,高阻岩层截止频率高,低阻岩层截止频率低,当地下有几个电阻率不同的岩层界面时,截止频率与深度之间有很密切的关系,如地下只有一种岩层,仪器输出稳定的音调和音响信号,听到中等音调;地下有几个不同电阻率的几个岩层,收听到高低不同的音调。

当操作员将仪器的深度旋钮对准某个数据时,实质是指到接收反辐射场的某个截止频率上,这时仪器的滤波和音响系统自动不断地将该深度上岩层的主要电性特征转换成音响信号。

类似上述新技术新方法,实用价值大,效果佳,效益显著。它的独特功能,是目前国内所有的地球物理勘探方法不能比拟的,它必将使整个找矿工作出现一个崭新的局面。

## 2 古迹的发现及探伤

### 2.1 古迹的发现

要用一些现代化的切实可行的办法,准确有效地把古迹寻找出来,可以采用地球物理勘探的方法,把物探方法用于考古这是一个新的尝试,是一个创新,主要手段有两个:

#### (1) 常规的有效的地球物理勘探方法

(2) 最新的地球物理勘探方法,如 GDP-12 地球物理数据收录系统和 PS 法;这些方法可准确地发现古迹在地下的空间位置、埋深、规模大小、形态等,利用地球物理方法不仅给找矿工作带来生机,而且也可以把考古工作推向新阶段。

虽然德国和法国应用电法探查古遗址,日本应用浅层地震法探测古墓葬,美国和德国应用遥感技术进行大面积的考古普查,但是,应用新方法和新技术还远远不够。我国已多次探索,但由于手段缺乏,设备落后,使许多地下文物古迹的勘探处于停滞不前的落后状况,如北京十三陵,仅勘探定陵、长陵等极少量的陵墓,陕西的秦始皇陵仅发现了兵马俑,还有大量的地下文物古迹得不到应有的勘探,十分可惜。所以,利用常规的物探方法和物探新方法新技术发现地下文物古迹是非常必要的。因为我国古代各类建筑,如陵墓、住宅、宫殿、城墙等的建筑材料为夯土层或经人加工的石头层、砖瓦层,它们与周围的自然土层存在一定的电性差异(高阻或低阻),如图 1。它的埋深一般不大(数十米),因此它们能改变浅层电场分布<sup>[1]</sup>,所以,用直流电阻率法勘探空洞型古墓葬、古甬道、古窖藏、古城墙等地下文物是有成

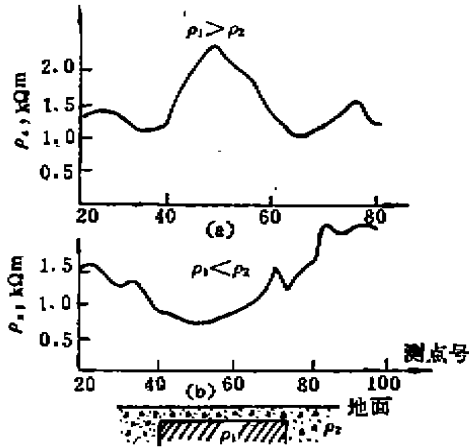


图 1 不同围土情况夯土层上实测  $\rho_s$  剖面曲线

(a) 剖面是安徽某地明代城门夯土基础上实测  $\rho_s$  曲线。夯土基础的围土为粘土层， $\rho_s$  曲线在城门基础位置上产生明显的异常，夯土层呈高阻反应。

(b) 剖面是河南某地宋代夯土建筑遗址上的实测  $\rho_s$  曲线。其围岩为沙土层， $\rho_s$  曲线在夯土层位置上产生了低阻异常。

效的。直流电阻率法一般可解决：a. 探测地下文物存在范围内地层分布和浮土厚度；b. 寻找地下文物存在位置、范围、走向；c. 确定文物遗存的埋深和延深，文物勘探与找矿、石油、水文、工程地质等方面勘探相比，有埋藏浅、异常小的特点。另外，各类大型文物的几何形状有一定的规律性和已知性，为勘探成果解释提供有利条件。因此要创造条件，为开拓物探方法在考古工作中应用的新局面。

上述几个实例经钻探验证与电阻率法推断结果吻合。如果再使用先进的 PS 法寻找古迹将会取得更加惊人的效果。

### 2.2 古迹探伤

通过古迹的发现，找到了十分珍贵的古物，它的完好程度与价值是紧密相关的，所以，对价值昂贵的古建筑和古物必须进行检测（探伤），探伤必须是非接触式的、无损的。对文物古迹的无损探伤是正在研究的新课题。

综上所述，文物古迹的发现及探伤，是考古工作的两个重要组成部分。下面介绍对古物进行无损探伤的几种方法：

(1) 射线探伤<sup>[1]</sup> 它不受温度、压力等因素影响，当 X 射线和  $\gamma$  射线照射到物体上时，只有一部分透射线才是有用的，其它射线对射线探伤是有害的，是一种干扰。

各种射线都有穿透物体性质。X 射线和  $\gamma$  射线穿透力大，又有使照相胶片感光或使荧光体发光的性质，所以，利用这些性质，使穿过物体的 X 射线或  $\gamma$  射线产生可见图象来检查物体内部缺陷，当被测的古物中存在深度为  $\Delta S$  小缺陷时，透过缺陷部分后的直接透射线的强度要比无缺陷部分透射线强。如图 2 中的 P' 点的 X 射线总强度大于 P 点的 X 射线总强度。

$\gamma$  射线探伤仪是根据物质对  $\gamma$  射线的吸收原理设计的。若被测古物中有损伤，则  $\gamma$  射线穿过内部有损伤的部位时，穿过的射线将突然增加，探伤仪的指示随之突然变化，根据指示变化的大小、时间和被测古物相对放射源的运动速度和位置，可判断出损伤大小和位置。利用  $\gamma$  射线探伤仪可检查管状古物的裂缝和块状古物内部空洞。

射线照相之所以能发现古物内部存在的缺陷，是由于缺陷部分和无缺陷部分在底片上产生了黑度差。用肉眼观察射线底片时，黑度差越大就越容易识别缺陷。

射线照相之所以能发现古物内部存在的缺陷，是由于缺陷部分和无缺陷部分在底片上产生了黑度差。用肉眼观察射线底片时，黑度差越大就越容易识别缺陷。

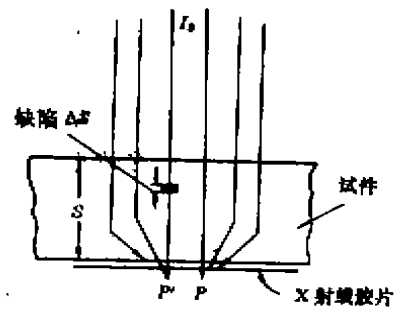


图 2 射线探伤的原理

(2) 红外辐射探伤<sup>[2]</sup> 见图 3，它的原理是：红外光是太阳光谱红光外面的不可见光，从紫光到红光热效应逐渐增大，而最大热效应却位于红外光。除太阳能辐射红外线外，自然界中任何物体只要它本身有一定的温度（高于  $-273^{\circ}\text{C}$ ）都能不断地辐射红外光。物体温度越高，辐射

功率越大。

扫描记录或观察被测古物表面上的由于缺陷和材料不同的热特性引起的温度变化。根据  $M = \epsilon \sigma T^4$  ( $W/cm^2$ ), 当一个古物表面的发射率  $\epsilon$  不变时, 该物体的辐射功率  $M$  与其温度  $T$  的四次方成比例。因此, 对古物辐射功率的探测, 实际上就成为对古物表面温度的探测。式中  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

将一固定热量  $q$  加在古物表面时, 热流均匀地注入古物表面并扩散进入古物内部, 其速度由内部性质决定。如古物内部有缺陷存在, 则均匀热流就被缺陷阻挡(热阻), 经过时间延迟在缺陷部位发生热量堆积, 在其表面产生过热点, 表现为温度异常。如用红外仪器扫描古物表面, 测量古物表面分布情况, 当探测到过热点, 就可断定出现过热点的表面下方存在缺陷。如用辐射计探测, 在记录纸上会出现一个正值尖峰曲线; 如用热象仪观察, 在荧光屏上出现一亮斑。

所以, 使用这种方法, 可探测胶接和粘接的古物中的脱粘或未粘透部位, 古物中的裂纹、空洞、夹杂等缺陷。

用红外测温的特点: a. 非接触检测。不与被测物体接触, 不影响被测目标的温度分布, 这样对远(或近)距离, 带电以及其它不可接触目标都可用红外辐射检测温度; b. 反应速度快。十分之几秒内可对高速运动目标测温; c. 灵敏度高。只要目标有微小的温度差异就能分辨出来; d. 测温范围广。可测  $-170 \sim 3200$   $^{\circ}C$  的温度范围; e. 加热和探伤设备比较简单。操作简便, 安全可靠, 易实现自动化; f. 显示记录方式多样, 形象直观, 判读容易, 能显示缺陷大小, 形状和缺陷深度; g. 在考古研究中, 可用红外热象仪对文物古迹、古代字画进行鉴定, 解决疑难, 判明真伪, 可检查非金属、金属、陶瓷、橡胶等板、棒、管材及制品中的脱粘, 分层、孔洞、裂纹、气泡、厚度不均、截面异变、异物、建筑物等各种缺陷。

利用红外辐射检查古物内部的缺陷是一种巧妙的应用。

例: 四块金属板压粘在一起, 交界面是否粘接良好, 均匀加热平板的一个表面, 测量另一个表面的温度分布, 热流在测量面出现温度异常现象, 当第一板受热升温, 热量向底板流去, 底板外表面的温度随之升高, 如交接处某一部位没粘好, 热流在这里受阻, 底板外表面与此部位相对应位置上就出现温度异常现象。见图4。

(3) 超声波探伤<sup>[3]</sup> 超声波是人耳所不能听到的声波, 它有许多特点, 如频率高, 因而波长短, 绕射现象小, 方向性好, 能成为射线而定向传播。穿透本领大, 超声波在液体和固体中衰减小, 尤其是对光不透明的固体中超声波却能穿透几十米的长度而衰减小, 碰到杂质或分界面就会有显著的反射。探测灵敏度高, 能准确地确定缺陷位置和深度, 可用不同波型探测, 应用范围广。利用超声波探伤方法很多。

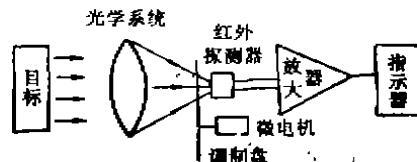


图3 红外测温仪结构原理

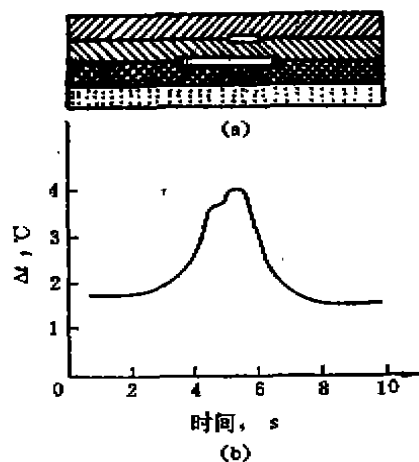


图4 单面法检查四层胶接结构记录曲线

- (a) 含有脱粘缺陷的四层试件截面图;  
(b) 单面法检查沿通过缺陷的扫描线上的温度分布。

仅以反射法为例。反射法是以声波在古物中反射情况不同来探测缺陷的方法。下面介绍反射法中的脉冲反射法。这种方法是当脉冲超声入射至被测古物后传播到有声阻抗差异的界面上(如缺陷与古物表面)时,产生反射声波,在古物内的反射情况,就会显示在荧光屏上,根据反射波的时间及形状来判断古物内部缺陷及材料性质。该方法又根据入射声波的波型不同又有不同的方法:如 a. 纵波探伤法, b. 横波探伤法; c. 表面波探伤法等。而脉冲反射波法的主要特点是: a. 探测灵敏度高; b. 能准确地确定缺陷位置和深度; c. 可用不同波型进行探测,应用范围广。

现分别介绍纵波探伤法中的一次脉冲反射法和多次脉冲反射法;及横波探伤法和表面波探伤法。

图 5 是一次脉冲反射法,它是以一次底波为依据进行探伤的方法。其原理是脉冲波发生器产生的高频电脉冲(发射波)加在探头和放大器上激励压电晶体片振动,使产生超声波。超声波以一定的速度向古物内部传播,一部分声波遇到缺陷(F)时,反射回来,另一部分声波继续传至古物底面

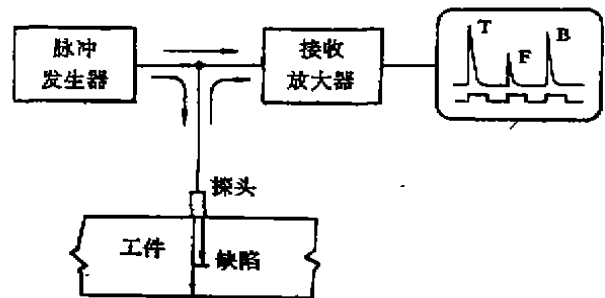


图 5 脉冲反射法的原理示意图  
T—发射波; F—缺陷波; B—底波。

后也反射回来,由于缺陷和底面反射回来的声波被探头接收时,又变为电脉冲。发射波 T, 缺陷波 F, 底波 B 经放大器后在荧光屏上显示。荧光屏上的水平亮线为扫描线(时间基线),其长度与时间成正比,由 T, F, B 波在扫描线上的位置,即可求出缺陷的位置,由缺陷波的幅度,可判断缺陷的大小(缺陷面积大时,幅度高),由缺陷波的形状,结合加工工艺特点可分析缺陷性质。当缺陷大于声束截面时,声波全部由缺陷处反射回来,荧光屏上只有发射波 T, 缺陷波 F, 而无底波 B, 当古物中无缺陷时,荧光屏上只有 T, B 波。

多次脉冲反射法,它是以多次底波为依据进行探伤的方法。其原理是声波由底部反射回探头时,一部分声波被探头接收,另一部分又折回底部,这样往复反射,直至声能全部衰减完为止。如古物中无缺陷时,则荧光屏上出现呈指数曲线递减的多次反射波,见图 6。

当古物内有吸收性缺陷时(如疏松等),声波在缺陷处的衰减很大,底波的反射次数减少,甚至消失,以此判断有无缺陷及严重程度,适用于板状古物。

横波探伤法是以一定角度入射到古物,其原理是横波入射古物后,当所遇缺陷与声束垂直或倾斜不大时,声波反射回来,在荧光屏上出现缺陷波。如探测板状古物遇有与声波垂直的缺陷时,出现缺陷波 F, 如探头离板端近时,出现板端面反射波 B, 如探头离板端远时,声能在板内逐渐衰减完,则不出现端面反射波,见图 7。

表面波探伤法是表面波沿被测古物表面的传播。表面波的能量随表面深度的增加而显著降低。表面波沿古物表面的传播过程中遇到缺陷(如裂纹)时,产生反射,在荧光屏上出现缺陷波,该方法适用测定表面缺陷,见图 8。

(4) 工业电视探伤,对古物缺陷探伤有两种方法(内部和表面探伤)。

对于古物的内部缺陷探伤,往往利用工业 X 射线电视检测法。

对于古物的表面缺陷探伤,多用荧光磁粉探伤法。

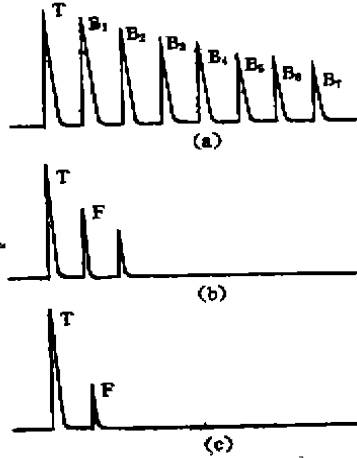


图6 多次脉冲反射法探测吸收缺陷时的波形  
(a)一无缺陷; (b)一有吸收性缺陷;  
(c)一缺陷严重。

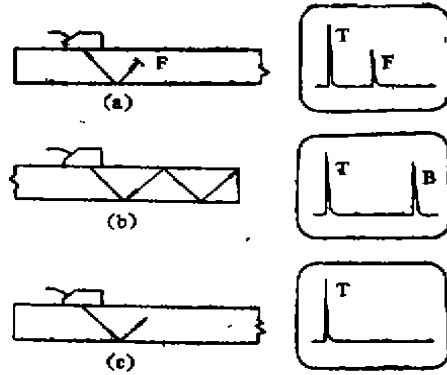


图7 横波单探头法探伤示意图

(a)一有缺陷时的反射; (b)一遇端面时的反射;  
(c)一探头离端面远时。

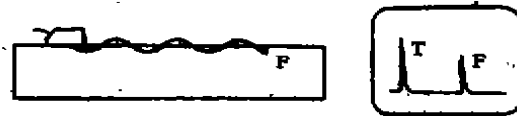


图8 表面波单探头法探测缺陷

①内部探伤。原理是X射线通过密度变化的物质,就有不同的衰减辐射,被测吸收体的密度越小,射线强度越大。经图象增强管,将X光转换成可见光的图象,并将图象光亮度增益到600—4000倍,聚焦成直径11mm左右的图象。摄像机把接收到的图象光信号转换成视频信号,再经电子设备处理后加到监视器上,观察到古物内部的质量情况和变化情况。X射线检测多应用于粘接部件探伤: a.板状古物粘接的探伤,这种几何形体简单,易于实现X射线电视无损检测自动化; b.管状古物粘接的探伤,大口径小口径等, X射线源放在管内,图象增强器及摄像机在外,不同粘接件可采用不同的方法探伤。优点是: a.可直接观察到物质内部在静态和动态下的情况,并能多次观察; b.可连续流水作业,可在自动线进行检测; c.消耗材料少,节省人力和物力,缩短时间,提高速度。X射线检测系统在国内是一种新方法,应用于一些专门领域(军事、公安、地质、海关、医学、生物、机械、冶金、食品、化工、航空)。

②外部探伤。原理是把古物充磁喷以荧光磁粉,清洗后在紫外灯照射下,古物表面上的缺陷及裂痕处出现荧光。它采用电视扫描和机械扫描混合方式,大大提高了检测速度。采用光学镜头成象,不仅提高了聚光能力及灵敏度,更主要由于镜头离古物较远,依靠背景深,可检测不规则古物的缺陷,因此,对异形古物可实现自动检测,提高可靠性,使误差率大大降低。电视扫描是逐点取得光信号,其强弱仅决定于表面裂纹光强度的变化。

### 3 结 语

找矿与考古的新技术新方法的研究,在国际上是一个热门,这是很有实用价值的新课题。在用古物探伤中列举了几种方法,到底选择哪一种方法最有效,视古物的不同特征而定。

### 参考文献

- 1 日本无损检测协会。射线探伤。李衍译。北京：机械工业出版社，1988，12
- 2 纪红。红外技术基础与应用。北京：科学出版社，1979，183
- 3 超声波探伤技术及探伤仪编写组。超声波探伤技术及探伤仪。北京：国防工业出版社，1977，47-50
- 4 张寅生。物探与化探。北京：地质出版社，1987，462

## Applications of Modern Technology to Mineral Exploration and Archaeology

*Zhang Chi*

**Key Words:** geophysical data acquisition, lithological electronic instrument, PS method, mineral exploration, archaeology, flaw detection.

### ABSTRACT

With the help of the latest GDP-12 geophysical data acquisition system and lithological electronic instruments, the mineral exploration is greatly enhanced and historic sites can be accurately located if combined with some tested and effective conventional geophysical exploration methods, such as DC resistivity method, electrical sounding method, shallow seismic method and remote sensing etc. Furthermore, ancient buildings and antiques can be investigated by means of the most up-to-date flaw detection techniques, i. e. radiation flaw detection, ultrared radiation flaw detection, supersonic wave flaw detection and industrial television flaw detection etc.

(Received May 14, 1990)